

# КОМПОЗИТНЫЙ ПРОВОД Cu-Mg: ПОЛУЧЕНИЕ, СТРУКТУРА, СВОЙСТВА

*Прилукова О.В., Клюкин И.В.*

*Руководители – проф., д.т.н. Бараз В.Р., д.т.н. Волков А.Ю.*

УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Институт физики металлов УрО РАН, г. Екатеринбург

## **Введение**

Медь и сплавы на её основе широко применяются в промышленности для производства токопроводящих изделий, используемых в различных электрических устройствах. К примеру, медную проволоку применяют для получения кабелей, проводов, обмоток трансформаторов, плавких предохранительных устройств и т.д.

Преимуществами меди как проводникового материала является: малое удельное сопротивление, стойкость к коррозии, хорошая обрабатываемость, легкость пайки и сварки. Медь прокатывается в листы, ленты и протягивается в проволоку, толщина которой может быть доведена до микрометра.

Однако кабели и провода из меди занимают значительную долю от общего веса электрических устройств. Поэтому многие зарубежные фирмы и отечественные исследователи уделяют большое внимание поиску и разработке методик, направленных на её упрочнение, т.к. это позволит уменьшить диаметр используемых проводов [1]. Стоит отметить, что такое упрочнение не должно негативно влиять на электропроводность и другие физико-механические свойства меди.

Большинство медных сплавов не в состоянии удовлетворить всем этим требованиям. К примеру, сплавы системы Cu-Mg с содержанием магния до 1% позволяют в 1,5-2 раза повысить прочность, но при этом происходит снижение электропроводности и существенно падает коррозионная стойкость. Возникает идея создать композитный провод, внутри которого помещается высокопрочная сердцевина из сплава Cu-Mg, окруженная медной матрицей.

## **Цель работы**

Основная цель работы заключалась в упрочнении меди путем введения в медную матрицу большого количества волокон из Cu-Mg жил. Для решения поставленной задачи необходимо разработать технологию, подобрать методики воздействий, изучить эволюцию микроструктуры образцов.

## **Результаты работы**

Известно, что механические свойства металлов и сплавов напрямую зависят от степени дисперсности их структуры. Для повышения этих свойств осуществляется значительная фрагментация структурных

элементов (вплоть до наноуровня), для чего применяют различные способы интенсивной пластической деформации (ИПД).

Основным недостатком магния и его сплавов является их малая пластичность. При комнатной температуре в литом состоянии магний обладает крайне малой пластичностью, которая не превышает 8 %. Поскольку магний имеет ГПУ решетку, его деформация в основном осуществляется скольжением по плоскостям базиса. Для включения дополнительных систем скольжения обычно увеличивают температуру деформации, что приводит к укрупнению зерна и окислению магния.

В рамках данной работы нами была разработана технология, позволяющая из образцов цилиндрической формы диаметром 18 мм методом гидроэкструзии при комнатной температуре получать магниевые стержни различных диаметров. Минимальный диаметр изготовленного стержня составил 1,95 мм, максимальная степень деформации достигла 98,8 %. Разработанная методика является ноу-хау ИФМ УрО РАН.

Гидроэкструзии подвергались образцы, изготовленные из слитка технически чистого магния марки МГ-95. Содержание магния в слитках 99,95 %, основная примесь алюминий. Оптическая микроскопия показала, что слиток имел столбчатую литую структуру со средней высотой зерен  $h_{\text{ср}}=7,7$  мм и средней шириной  $d_{\text{ср}}=2,4$  мм (рис. 1 а). После интенсивного воздействия на магний методом гидроэкструзии в полученных стержнях диаметром 5 мм наблюдалась волокнистая структура с размером волокон в поперечном сечении около 0,2 мкм (рис. 1) [2]. Таким образом, применяемая методика позволила измельчить зерно в магнии приблизительно на три порядка.

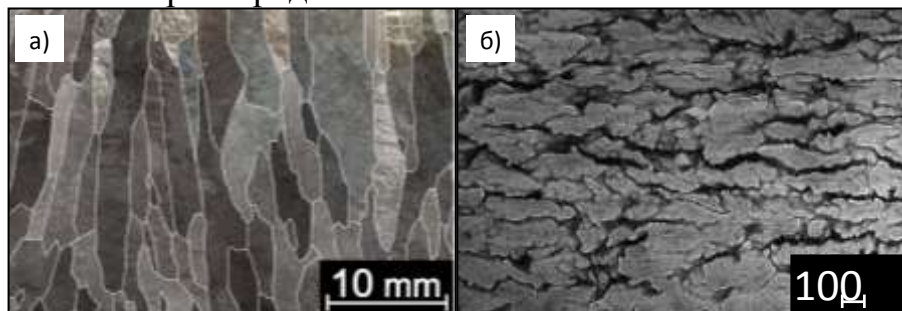


Рис. 1 – Микроструктура магния в исходном состоянии (а) и после гидроэкструзии (б)

Для аттестации физико-механических свойств магния в полученном структурном состоянии проводились механические испытания на растяжение проволочных образцов диаметром 1,95 мм, полученных гидроэкструзией, и проволоки диаметром 1,5 мм, изготовленной волочением. Также исследовалась термическая стабильность структуры сильнодеформированного магния под влиянием отжигов. Отжиги проводились по шесть часов в интервале температур 100÷450 °С.

На рис. 2 представлены графики зависимости предела текучести и предела прочности (а), а также пластичности (б) от температуры отжига образцов.

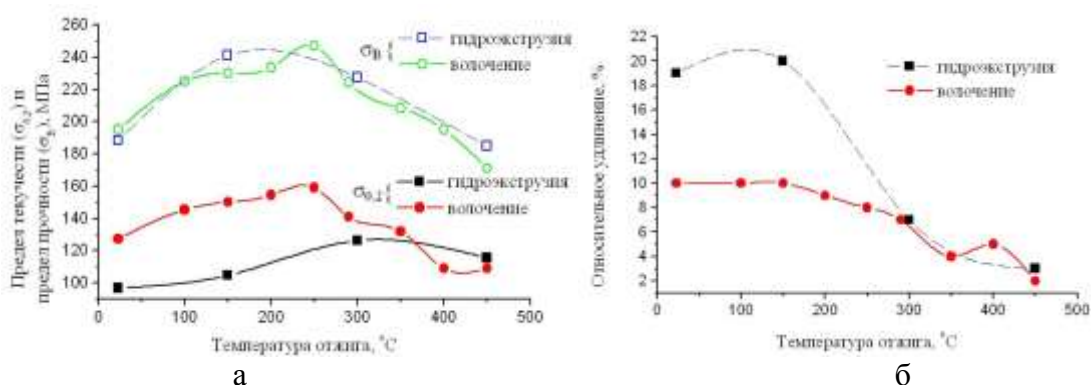


Рис. 2 – Графики зависимости от температуры отжига образцов магния после гидроэкструзии и волочения:

а – предела текучести и предела прочности; б - пластичности

Результаты испытаний свидетельствуют о том, что после термообработки при температурах ниже 300 °С предел текучести экструдированных образцов ниже предела текучести полученных волочением. Отметим, что пластичность образцов магния после гидроэкструзии превышает 20% на растяжение. Анализ литературы показывает, что ранее столь высоких пластических свойств на магнии не было получено. Механические свойства при отжиге в интервале температур 300÷450 °С близки по значению вне зависимости от способа деформации.

Пруток из магния, изготовленный методом гидроэкструзии, приобретает структуру и свойства, позволяющие осуществлять его дальнейшую деформацию волочением при комнатной температуре. Этот результат мы использовали на практике и, поместив в медную трубку экструдированный магниевый стержень, волочением при комнатной температуре изготовили композитный провод диаметром 0,25 мм, плотностью  $\rho = 5,5 \text{ г/см}^3$  и удельным электросопротивлением  $2,5 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ .

Введение химически активного магния внутрь медной матрицы надежно защищает его от воздействия окружающей среды и не снижает коррозионную стойкость композита.

В ходе дальнейших исследований проводилось упрочнение медной матрицы путем помещения в нее большого количества экструдированных стержней из магния. В результате чего нами были получены композитные провода с общим количеством упрочняющих жил от 7 до 400 шт.

При изучении микроструктуры композита, содержащего 400 Cu-Mg жил, было установлено, что средний размер магниевых жил составляет 60 мкм, а средний размер зерен в этих жилах 1-2 мкм (рис.3).

Увеличение количества жил, внедряемых в медную матрицу, и уменьшение их диаметра позволяет достигнуть наибольшей площади контакта на границе меди и магния по всему сечению композитного материала.

Таким образом, в ходе проделанной работы была разработана технология получения многослойных композитов Cu-Mg за счет использования гидроэкструзии. В настоящее время мы занимаемся подбором таких режимов термомеханической обработки, которые не только позволят повысить прочность сцепления на границе меди и магния за счет процессов диффузии, но и поспособствуют выделению упрочняющих фаз.

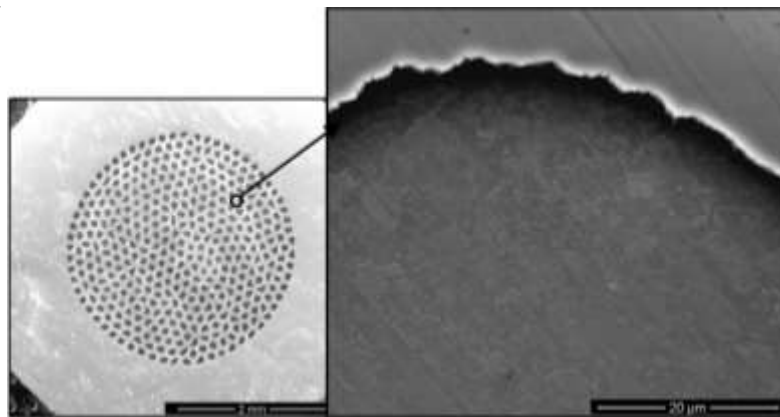


Рис. 3 – Микроструктура композита, содержащего 400 Cu-Mg жил

**Работа выполнена при финансовой поддержке Уральского отделения РАН: проект № И-2.**

#### **Список использованных источников**

1. Kazunari Maki, Yuki Ito, Hirotaka Matsunaga, Hiroyuki Mori. Solid-solution copper alloys with high strength and high electrical conductivity // *Journal of Scripta Materialia*. 2013. V. 68. P. 777–780.
2. Н.А. Кругликов, Ю.Н. Логинов, Б.И. Каменецкий, Р.А. Саврай, А.В. Долматов, И.В. Клюкин, А.Ю. Волков. Микроструктура и механические свойства литого магния // *Литейщик России: официальный журнал Российской ассоциации литейщиков* №8 2013. С. 17-21.